

気候変動対策シナリオにおけるエネルギー構成と エネルギー安全保障

Energy Structure and Energy Security under Climate Change Mitigation Scenarios

松本 健一¹

Ken'ichi Matsumoto

Depletion of energy resources will be one of the most significant issues in this century, and it will become reality because of economic and population growth, especially in developing countries, if the world develops as in the past. Consequently, energy security will be a more severe issue in the future than in the present. Climate change is also one of the most important global issues, and climate change mitigation measures are indispensable to avoid dangerous climate change. If more renewables are introduced to mitigate climate change, the energy security issue is expected to be reduced because they are basically domestic. From these viewpoints, we analyze how energy structure changes and whether energy security improves under various climate change mitigation scenarios by using the AIM/CGE [Global] model. We apply the Representative Concentration Pathways, a set of greenhouse gas concentration/emission scenarios, as the mitigation scenarios. We find that energy structure will be changed to rely more on renewables than on fossil fuels by introducing the climate mitigation measures. The more severe the measures, the further improvement of energy security will be realized as well as climate mitigation. The trade volume of fossil fuels also decreases by introducing the measures.

キーワード：気候変動対策、エネルギー構成、エネルギー安全保障、応用一般均衡モデル

Key Words : Climate Change Mitigation, Energy Structure, Energy Security, CGE Model

1. はじめに

気候変動は現代の最も重要な地球環境問題であり、世界各国ならびにUNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) を初めとする国際的な場で中長期的な視点での政策的議論が続いている。2009年12月のCOP15ではコペンハーゲン合意が了承され、UNFCCC附属書I国ならびに主要な非附属書I国が2010年1月末までに2020年の温室効果ガス (GHG : Greenhouse Gas) の排出削減に関する約束を提出した。今後のCOPでは、2013年以降のポスト京都議定書に向けた新た

な議定書が策定されるか否かが注目される。

一方、エネルギーに関しても、価格高騰や資源枯渇など、地球規模の重大な問題となっている。近年、中国をはじめとする新興国では、その経済成長と人口増加にともないエネルギー消費量が急増し、今後も増加し続けると予測されている (BP, 2011; IEA, 2010)。そのため、今後エネルギーの需給逼迫が懸念される。加えて、石油や天然ガスといった化石燃料は生産量や埋蔵量が偏在しているため (BP, 2011)、特に日本などエネルギー資源の乏しい国は、価格変動や地政学的なリスクを抱えている。

気候変動対策²はGHG排出量を削減することであり、特に気候変動への寄与度が最も高いCO₂の排出削減が最も効果的である。CO₂排出削減には、省エネルギーの促進、そして、低炭素エネルギーへの転換、つまり石炭から天然ガス、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換が必須である。より厳しい排出削減を実現するために、今後はより大幅な省エネルギーと再生可能エネルギーの利用が求められる。

このように気候変動対策の導入により省エネルギーとその多くが国産である再生可能エネルギーの利用が進めば、エネルギーの輸入量・輸入依存度が低下し、エネルギー安全保障の面からもプラスであると考えられる。気候変動とエネルギー安全保障の問題についてはStanislaw (2007)でも指摘されている。また、気候変動政策におけるエネルギーの役割についてはIEA (2008)などでも検討されている。

本研究では、応用一般均衡 (CGE: Computable General Equilibrium) モデルを用いて、気候変動対策を導入した際の世界および各国のエネルギー構成ならびにエネルギー安全保障について分析する。

2. モデル

本研究では、AIM/CGE [Global]モデル (Masui et al., 2011; Matsumoto and Masui, 2010)を用いて分析する。以下では、モデルの概要について説明する。

AIM/CGE [Global]モデルは、多部門・多地域の逐次動学型CGEモデルである。本モデルでは、世界は24地域から構成され、産業部門は21種類の財(およびサービス)を生産する(表1)。基本的に各財は単一の部門により生産されるが、発電部門では電源を考慮している。ここでは、火力や水力、原子力などの従来型の発電方式だけで

なく、太陽光、風力、バイオマス(エネルギー作物)などの再生可能エネルギーによる発電、CCS (Carbon Capture and Storage)技術も考慮している。また、バイオマスは発電のみならず、バイオエタノールやバイオガスといった化石燃料の直接利用の代替物の生産にも用いられる。本モデルでは生産関数として多段入れ子型のCES (Constant Elasticity of Substitution) 型関数を用いており、資本についてはputty-clayアプローチを用いている。各部門の生産には中間投入財と生産要素(資本・労働・土地・資源)が用いられる。なお、化石燃料などの資源は有限であり、累積採掘量の増加にともない採掘コストが上昇する (Rogner, 1997)。生産財は、最終消費、投資、中間投入および、輸出にふりわけられる。本モデルは2001年を基準年として2100年までを計算する動学モデルである。その動学構造は、労働は外生的に与える人口成長率に応じて経年変化するものとし、投

表1：地域および財・サービスの構成

地域	財・サービス
日本	農産物
中国	畜産物
韓国	林産物
インドネシア	水産物
タイ	鉱物(化石燃料を除く)
その他東南アジア	エネルギー集約財
インド	金属・機械
その他南アジア	食品
オーストラリア	その他財
ニュージーランド	水道
その他アジア太平洋	建設
カナダ	交通
アメリカ	情報通信
メキシコ	公共サービス
ブラジル	その他サービス
アルゼンチン	石炭
その他南米	石油
EU15(西ヨーロッパ)	天然ガス
EU10(東ヨーロッパ)	石炭・石油製品
ロシア	ガス供給
その他ヨーロッパ	電力
中東	
南アフリカ	
その他アフリカ	

2 本研究では、気候変動対策として緩和策のみを考え、適応策は考えないものとする。

資は外生的に与える期待GDP成長率を達成するように決定されるものとしている。また、年々のエネルギー効率改善も外生値であり、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) のSRES(Special Report on Emission Scenarios) B2シナリオに基づく(Nakicenovic and Swart, 2000)。

本モデルでは、シナリオごとにAIM/Impact [Policy]モデル(Hijioka et al., 2008)により推計された全球規模の各GHGの排出経路を制約条件(気候変動対策)として用いている³。全球の排出制約は各地域に割り当てられるが、2050年以降は当該地域の人口に比例するように割り当て、基準年から2050年の間は基準年と2050年の排出量より線形に内挿することにより求められる。また、モデルには世界共通の排出権取引市場を仮定している。

家計部門は、生産要素を保有し、その供給から得られる所得を最終消費と貯蓄にふりわける。貯蓄は、投資と同レベルになるように決定される。各財の消費量は、上記の所得を制約条件として、各期の効用が最大になるように決定される。

本モデルでは、経済データとしてGTAP6 (Dimaranan, 2006)を、エネルギーデータとしてIEA (2007a, b)を用いる。

3. シナリオ

3.1 リファレンスシナリオ

気候変動対策シナリオを設定するにあたって、まずリファレンスシナリオを設定する。リファレンスシナリオは気候変動対策を導入していないシナリオであり、GHGの排出抑制を目的とする追加的な政策は導入されない。ただし、既存の政策や気候変動対策以外の環境政策は考慮されている。

リファレンスシナリオはSRES B2シナリオ(Nakicenovic and Swart, 2000)を改良したものであり、人口と経済に関する想定を従来のものより変更している。人口については、2050年まではUN (2007)の中位推計を、それ以降はUN (2004)を用いている。そして、経済については、UNEP (2002)およびUNEP (2007)のSustainability Firstシナリオを用いている。

リファレンスシナリオでは、2100年の世界人口は98億人、GDPは\$225兆となる。また、CO₂排出量は277億tC、放射強制力は7.3W/m²に達する。

3.2 気候変動対策シナリオ

本研究では、RCP(Representative Concentration Pathways)シナリオを気候変動対策シナリオとして用いる(RCPの詳細についてはMoss et al. (2010)やvan Vuuren et al. (2011a)を参照)。RCPはIPCCの次期評価報告書(第5次)に向けた第一段階であり、気候変動研究では最も新しいシナリオ群の一つである。RCPは2100年の放射強制力により規定され、最も低い2.6W/m²、最も高い8.5W/m²、そして、その中間の安定化シナリオである4.5W/m²と6W/m²の4シナリオから構成されている(各RCPシナリオについては、Masui et al. (2011)、Riahi et al. (2011)、Thomason et al. (2011)および、van Vuuren et al. (2011b)を参照)。2100年のCO₂排出量は高いものから順に296億tC、130億tC、50.1億tC、4.7億tCである。

本研究では、以上の気候変動対策シナリオをAIM/CGE [Global]モデルにより分析し、リファレンスシナリオと比較する⁴。

3 本研究では、CO₂、CH₄、N₂O、HFC、PFC、SF₆の京都6ガス以外にもCO、NO_x、NH₃、SO₂、非メタン揮発性有機化合物、黒色炭素、有機炭素を対象ガスとしている。

4 各RCPの分析では用いられているモデルが異なるため、厳密には6W/m²以外は本来のRCPの分析とは異なる。また、8.5W/m²はリファレンスシナリオよりも放射強制力が高いため、逆にGHG排出量を増加させる必要がある。以下では8.5W/m²の結果は省略する。

4. 分析結果と考察

分析の結果、一次エネルギー需要は全てのシナリオで2100年まで増加傾向にあるが、排出削減が厳しいシナリオほどエネルギー需要は減少する(基準年は429EJ、2100年はリファレンスシナリオで1189EJ、 $2.6W/m^2$ では651EJ)。また、エネルギー構成も大きく変化する(図1)。リファレンスシナリオでは2100年に化石燃料が90%に達し、特に石炭がその半分を占めるという高い割合となる。これは、GHG排出制約のない中で、相対的に低価格である石炭に依存するためである。一方で、気候変動対策シナリオでは、化石燃料、特に石炭の割合が低下し、代わりに再生可能エネルギーの割合が増加する。この傾向は、特に $2.6W/m^2$ で顕著であり、再生可能エネルギーの割合が60%を超える。水力とバイオマスを除く再生可能エネルギーの中では、リファレンスシナリオでは風力の割合が約75%と最も高いが、排出削減量が大きくなると太陽光の割合も高くなる($2.6W/m^2$ では風力58%、太陽光40%)。

再生可能エネルギーはその多くが発電に用いられるため、最終エネルギーに占める電力の割合も高くなる。リファレンスシナリオでも2001年の17%から2100年には42%まで増加するが、 $2.6W/m^2$ では50%を超える。

次に、世界全体での化石燃料の貿易量を見ると、基準年を100とすると、リファレンスシナリオでは2100年に200と2倍に達する(ピークは2090年の202)。一方、気候変動対策シナリオでは、 $6W/m^2$ では基準年よりも増加はするが154とリファレンスシナリオの75%程度となり、 $4.5W/m^2$ と $2.6W/m^2$ ではそれぞれ92.7と52.6と基準年を下回る。化石燃料別に見ると、気候変動対策シナリオでは石炭需要の減少にともない相対的に天然ガスや石油の貿易割合が増加するが、絶対量ではリファレンスシナリオと比較して両者ともに低下し、排出削減が厳

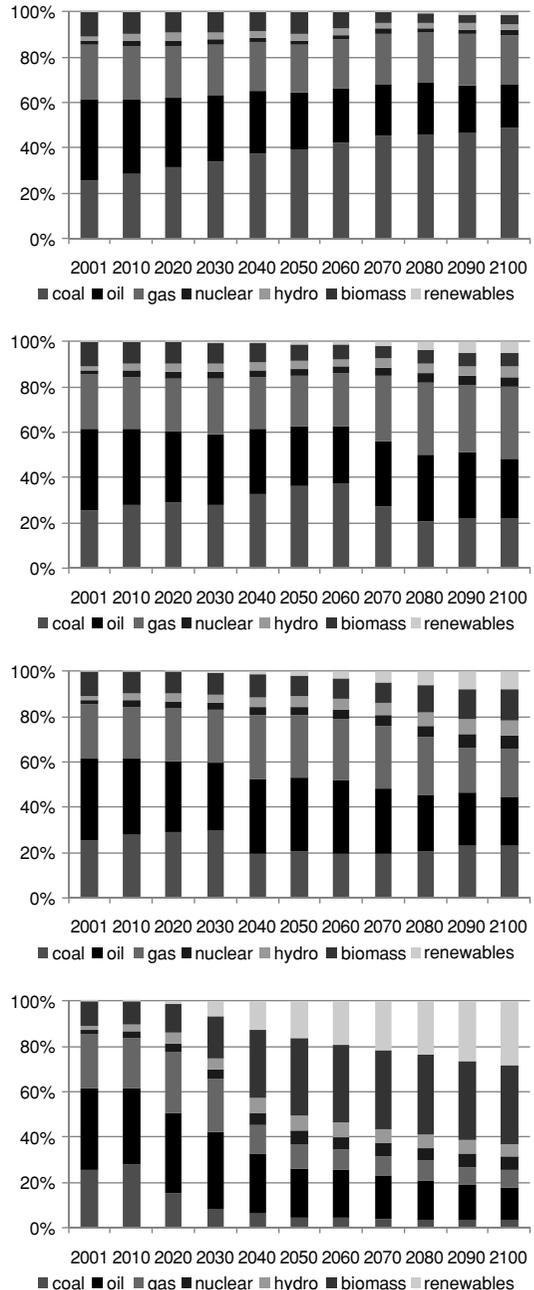


図1：一次エネルギーの構成
(上からリファレンス、 $6W/m^2$ 、 $4.5W/m^2$ 、 $2.6W/m^2$ 。
renewablesには水力とバイオマスを除く再生可能エネルギーが含まれる)

しいシナリオでは基準年を下回る。

以上の結果は、国・地域別に見ても同様にあてはまる。

本分析より、気候変動対策を導入してGHG排出量を削減するためには、導入しない場合と比較して化石燃料への依存度を低下させ、再生可能エネルギーの導入量を増加する必要があることが示された。そして、これは化石燃料の貿易量の低下にもつながる。つまり、気候変動対策を推進することにより、エネルギー自給率が向上し、特にエネルギーの海外依存度の高い国ではエネルギー安全保障の強化にもつながるのである。しかし、逆に言えば、現在、化石燃料の輸出により経済が成り立っている国では、経済にマイナスの影響が及ぶ可能性が考えられる。

5. おわりに

本研究では、AIM/CGE [Global]モデルを用いて、気候変動対策を導入した場合のエネルギー構成の変化とエネルギー安全保障への影響について分析した。分析では、気候変動対策シナリオとしてRCPシナリオを用い、リファレンスシナリオと比較した。

分析の結果、CO₂排出削減を実現するためには化石燃料依存のエネルギー構成から再生可能エネルギーを多用する構成へシフトする必要があり、排出削減が厳しいシナリオほど大幅なシフトが求められることが示された。このようなシフトは、気候変動の緩和と同時にエネルギー自給率を高め、エネルギー安全保障の観点からも効果的であることが示唆された。

参考文献

- BP (2011) Statistical Review of World Energy June 2011. <http://www.bp.com/statisticalreview> [Last accessed: 2011.8.30].
- Dimaranan, B.V. (ed.) (2006) Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 Data Base. Center for Global Trade Analysis, Purdue University: West Lafayette.
- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., et al. (2008) Global GHG Emission Scenarios under GHG Concentration Stabilization Targets. *Journal of Global Environment Engineering* 13, 97-108.
- IEA (International Energy Agency) (2007a) Energy Balances of OECD Countries (2007 Edition). International Energy Agency: Paris.
- IEA (2007b) Energy Balances of Non-OECD Countries (2007 Edition). International Energy Agency: Paris.
- IEA (2008) World Energy Outlook 2008. International Energy Agency: Paris.
- IEA (2010) World Energy Outlook 2010. International Energy Agency: Paris.
- Masui, T., Matsumoto, K., et al. (2011) An Emission Pathway for Stabilization at 6 Wm⁻² Radiative Forcing. *Climatic Change*, 109, 59-76.
- Matsumoto, K. and Masui, T. (2010) Economic Implications of Avoiding Dangerous Climate Change: An Analysis Using the AIM/CGE [Global] Model. *Journal of Environmental Science and Engineering* 4(7), 76-83.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., et al. (2010) The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature* 463, 747-756.
- Nakicenovic, N. and Swart, R. (eds.) (2000) Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press: Cambridge.
- Riahi, K., Rao, S., et al. (2011) RCP8.5-A Scenario of High Greenhouse Gas Emissions. *Climatic Change*, 109, 33-57.
- Rogner, H-H. (1997) An Assessment of World Hydrocarbon Resources. *Annual Review of Energy and the Environment* 22, 217-262.
- Stanislaw, J.A. (2007) Climate Change and Energy Security: The Future is Now. Deloitte White Paper.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., et al. (2011) RCP4.5: A Pathway for Stabilization of Radiative Forcing by 2100. *Climatic Change*, 109, 77-94.
- UN (United Nations) (2004) World Population to 2300. Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations ST/ESA/SER.A/236.
- UN (2007) World Population Prospects: The 2006 Revision. United Nations Publication: New York.
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2002) Global Environment Outlook 3. Earthscan Publications: London.
- UNEP (2007) Global Environment Outlook 4. Progress Press: Valletta.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., et al. (2011a) Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., et al. (2011b) RCP2.6: Exploring the Possibility to Keep Global Mean Temperature Change below 2°C. *Climatic Change*, 109, 95-116.

